بهینه‌سازی موقعیت‌های فشارسنجی در شبکهٔ توزیع آب به‌منظور به‌کارگیری در کالیبراسیون با اعمال نشت‌های گره‌ای فرضی*

(یادداشت پژوهشی)

علی نصیریان[۱] محمود فغفور مغربی[۲]

چکیده *مکان‌یابی طرح نمونه‌گیری بدون شک یکی از مهم‌ترین موضوعات در اقتصاد پایش شبکه‌های توزیع آب مـی‌باشـد. هـدف از ارائـهٔ روش مکان‌یابی طرح نمونه‌گیری در مقالهٔ حاضر، ارائهٔ روشی کاربردی برای یافتن بهترین نقاط برای فشارسنجی و هم‌چنین مشخص نمـودن تعداد بهینهٔ فشارسنج‌ها در شبکه می‌باشد. این روش بر پایهٔ ایجاد نشت فرضی و یافتن این نشت توسط نقاط مختلف فشارسنجی با کمک دو حلقه بهینه‌یابی مجزا به‌روش کلونی مورچه‌ها می‌باشد. این روش در مطالعهٔ موردی شبکه معروف به انیتون (Anytown) اعمـال گردیـد و بـه مقایسه نتایج با پژوهشهای قبلی پرداخته شد که در نهایت جواب های قابل قبولی به‌دست آمد. با کمک این روش قبل از عملیات فشارسنجی و نصب فشارسنج‌ها، می‌توان با انجام چند تحلیل بر روی مدل هیدرولیکی شبکه به راحتی نقاط مناسب و هم‌چنین تعداد بهینه فشارسنج‌ها را به‌دست آورد.*

واژه های کلیدی طرح نمونه‌گیری، فشارسنج، بهینه‌یابی، شبکه‌های توزیع آب.

Calibration of a WDN using Optimization Techniques in Localization of Pressure Measurements by Applying Artificial Nodal Leaks

A. Nasirian M.F. Maghrebi

Abstract *Undoubtedly, sampling design is an important issue in monitoring of a Water Distribution Network (WDN). The aim of the current paper which focuses on the localization of samplings, is to present a practical method for optimization of the position and number of the pressure measurements. This method works based on the assumption of some leakages in a network and searching for them by nodal pressure readings with the aid of two optimization loops using Ant Colony Optimization technique. The method is applied to the anytown network and the obtained results are compared with the previous works. The results are in good agreement with each other. Prior to field works of the installation of the pressure gages on the network, by analyzing the hydraulic model of the network, one can easily propose the best as well as the least nodes of the pressure measurements.*

Key Words Sampling design; Pressure measurement; Optimization; WDN.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۲/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری عمران آب، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع به‌گستردگی توسط طراحان، کارشناسان بهره‌بردار از شبکه، مشاوران و... برای آنالیز، طراحی، بهره‌برداری و بررسی عملکرد و قابلیت اطمینان شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اینکه مدل قابل استفاده باشد باید نخست کالیبره شود [1]. این امر با تعیین برخی پارامترهای دارای خطا در شبکه تا ایجاد یک هماهنگی قابل قبول بین مشاهدات فشار در شبکه و نتایج پیش‌بینی مدل انجام می‌شود [2]. با توجه به هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری‌ها، برای هر چه مؤثرتر بودن اندازه‌گیری‌ها، معمولاً نخست طرح نمونه‌گیری بهینه (Optimal Sampling Design) برای شبکه انجام می‌شود. با توجه به نوع کالیبراسیون، این مسأله می‌تواند شامل کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه برای اطلاع از وضعیت مصارف و فشار و سایر پارامترهای هیدرولیکی [3,4,5] و یا اهداف کیفی برای شناسایی هر چه سریع‌تر و با ریسک کمتر آلودگی[6] باشد.

به‌طور کلی فرآیند طرح نمونه‌گیری بهینه در کالیبراسیون شبکه‌های توزیع برای پاسخگویی به سؤالات زیر هدف گذاری می‌شود:۱- کدام پارامتر شبکه (فشار، جریان و ...) باید مشاهده شود؟ ۲- کجا مشاهدات انجام شود؟ ۳- چه دوره زمانی و با چه فرکانسی مشاهدات انجام شود؟ ٤- تحت چه شرایطی مشاهدات انجام شود (شرایط مصارف، پمپ و ...) [4]؟ اکثر تحقیقات پیشین از تحلیل ماتریس ژاکوبین(Jacobian Matrix) برای این منظور استفاده کرده‌اند. در این روش ماتریسی به نام ماتریس ژاکوبین تشکیل می‌شود که درایه‌های آن، نسبت تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده به تغییر یکی از پارامترهای مجهول در شبکه است. از ویژگی‌های این روش لزوم برابر یا بیشتر بودن تعداد معادلات از تعداد مجهولات می‌باشد و به‌عبارتی مسأله باید معین یا بیش‌معین باشد. از همین‌رو برای بهینه‌یابی مقدار پارامتر مجهول وقتی تعداد مشاهدات کم باشد ناچار به تعریف بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. به‌عنوان مثال اگر در شبکه ای ۵ پارامتر مجهول زبری تعریف شود و لازم باشد که موقعیت بهینهٔ یک نقطه فشارسنجی تعیین شود، باید حداقل ۵ حالت بارگذاری شبکه مورد مطالعه قرار گیرد.

اخیراً نشت‌یابی شبکه‌های توزیع به کمک کالیبراسیون فشارهای گرهی مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. اغلب این تحقیقات بر پایهٔ روش وو و سیج [7] استوار است. در این روش به کمک کالیبراسیون شبکهٔ توزیع به‌روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک و داده‌های میدانی، موقعیت نقاط مشکوک به نشت را شناسایی می‌کنند. از نکات حائز اهمیت در نشت‌یابی شبکه ها براساس کالیبراسیون فشارهای گرهی این واقعیت است که در زمانی که هدف از اندازه‌گیری فشار، نشت‌یابی باشد امکان گروه‌بندی گسترده در شبکه تا حدی که تعداد پارامتر ها با تعداد مشاهدات برابر شود، وجود ندارد و استفاده از روش‌هایی نظیر ماتریس ژاکوبین که نیاز به شرایط ایجاد دستگاه معادلات معین دارند با محدودیت همراه خواهد بود. در این تحقیق روشی کاربردی برای یافتن بهترین موقعیت فشارسنجی و نیز تعداد بهینهٔ فشارسنج‌ها ارائهٔ شده است. پارامتر تنظیمی در این تحقیق مصارف گرهی می‌باشد. روش کار بدین صورت است که نخست تعداد مشاهدات برای برنامه تعیین می‌شود. سپس یک نشت فرضی در هر یک از گره‌های شبکه ایجاد می‌شود و با تغییر موقعیت فشارسنجی، هر بار با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها سعی در یافتن موقعیت نشت و بهترین موقعیت فشارسنجی برای یافتن این نشت می‌شود. تعداد دفعات رسیدن به جواب نسبت به کل جابه‌جایی‌های فشارسنج‌ها به‌عنوان دقت روش با آن تعداد فشارسنج لحاظ می‌شود. هم‌چنین موقعیت‌هایی که بیشترین تکرار را در بین موقعیت‌های بهینه دارند

به‌عنوان موقعیت بهینه شناسایی می‌شوند. برای این منظور کد برنامه در نرم‌افزار متلب ۷. [8] نوشته شده است و تحلیل‌های هیدرولیکی نیز با استفاده از نرم‌افزار اپانت ۲.[9] صورت می‌گیرد. سپس با اتصال این دو نرم‌افزار به یکدیگر، تحلیل‌ها به‌صورت پیوسته انجام می‌شود.

مقالهٔ حاضر بر پایهٔ روشی آماری- احتمالاتی استوار است و بر خلاف روش‌های قبلی که پایهٔ ریاضیاتی- احتمالاتی داشته‌اند، عملاً هیچ‌گونه محدودیتی در انتخاب تعداد پارامترهای مجهول شبکه ندارد و این تعداد می‌تواند از تعداد اندازه‌گیری‌ها نیز فزونی یابد. هم‌چنین در این تحقیق از روش کلونی مورچه‌ها برای بهینه‌یابی استفاده شده است. بر اساس مراجع[10,11] این روش در کالیبراسیون شبکه و طراحی بهینهٔ آن دارای قابلیت‌های برتری نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

روش‌شناسی

روابط کالیبراسیون. تحلیل مسألهٔ نمونه‌گیری بهینه، نوعی مسألهٔ بهینه‌یابی است و در ارتباط با کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب قابل تحلیل است. کالیبراسیون شبکهٔ لوله‌ها شامل تعیین پارامترهای متعدد است و هنگامی که به مدل هیدرولیکی شبکه به عنوان ورودی داده شود، مقادیر به‌دست آمده از مدل با مقادیر مشاهداتی فشار و دبی از شبکهٔ واقعی برابر می‌شود [12]. تابع هدف کالیبراسیون شبکهٔ توزیع که در واقع یک مسأله با حداقل مربعات خطا است، چنین ارائه می‌شود:

$$\text{Minimize} \quad E = r^T W r \qquad (۱)$$

که در آن E تابع هدف اسکالر است که باید کمینه شود و W ماتریسی وزنی است که ارزش هر یک از مشاهدات نسبت به یکدیگر را اگر متفاوت باشند وارد مسأله می‌کند. r بردار N_o باقی‌مانده (خطا) می‌باشد که از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود و N_o تعداد مشاهدات است که می‌توانند در مکان‌ها و بارگذاری‌های مختلف انجام شود.

$$r_i = y_i^* - y_i(a) \qquad (۲)$$

در رابطهٔ فوق، r_i تفاوت بین مقادیر به‌دست آمده در مدل و مقدار واقعی یا مشاهداتی پارامتر iام می‌باشد که معمولا فشارسنجی در برخی گره‌ها و یا دبی سنجی در برخی لوله‌ها می‌باشد. y_i^* مقادیر مشاهداتی و $y_i(a)$ مقادیر محاسباتی متناظر فشار با دبی و aبردار N_a پارامتر مجهول در شبکه می‌باشد. N_a تعداد پارامترهای مجهول که معمولاً زبری لوله‌ها و مصارف گرهی شبکه می‌باشند که در کالیبراسیون باید تعیین شود. مسألهٔ کالیبراسیون باید با قیود ضمنی که همان معادلات حاکم بر شبکه و قیود صریح که بازه‌های تغییرات پارامترهای مجهول می‌باشد، باید تحلیل شود. لازم به ذکر است که این تابع هدف، در برنامهٔ کالیبراسیون فشارهای گرهی برای نشت‌یابی استفاده می‌شود و برای بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی در ادامه تابع هدف مربوط ارائه خواهد شد.

پارامترها و محاسبهٔ عدم قطعیت. در بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی با روش حاضر دو مسألهٔ مهم وجود دارد. ۱- میزان دقت مورد انتظار به ازای تعداد مختلف فشارسنجی ۲- بهترین نقاط فشارسنجی برای یک تعداد مشخص فشارسنج. همان‌گونه که بیان شد در ابتدا روش‌های بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی در شبکه با این فرض انجام می‌شد که همواره تعداد SN نقطه فشارسنجی بهینه شامل مجموعهٔ $SN-1$ نقطهٔ قبلی بوده و یافتن تنها یک نقطهٔ جدید برای یک مجموعه SN فشارسنج لازم است. بعدها مشخص شد که چنین نیست و ممکن است SN فشارسنج بهینه، موقعیت های متفاوتی نسبت به مجموعهٔ $SN-1$ قبلی خود باشد [13]. در روش حاضر نیز مجموعه SN نقطهٔ بهینهٔ فشارسنجی مستقل از مجموعهٔ $SN-1$ بررسی شده است. برای بررسی بهترین موقعیت فشارسنجی نشتی در گره jام فرض می‌شود و بهترین نقاط فشارسنجی (مجموعه SN نقطه) برای یافتن این نشت در بین Tek_m حالت جابجایی فشارسنج‌ها، شناسایی می‌شود. این عمل با فرض وجود نشت در کلیه موقعیت های محتمل نشت نیز انجام

می‌شود و هر مرتبه یک مجموعه جدید SN نقطه بهینه فشارسنجی به دست می‌آید. تعداد دفعاتی که یک گره به عنوان بهترین نقطه فشارسنجی انتخاب شود، نشان می‌دهد که برای نشت‌یابی در حالت کلی، آن گره تا چه حد مناسب است. برای این منظور تابع هدفی که باید کمینه شود مطابق رابطه (۳) می‌باشد.

$$\text{Minimize}\left|\sum^{NN}\left|D_l^* - D_l\right| + Tek\right| \qquad (۳)$$

که در آن D_l^* مقدار صحیح مصرف در زمان فرض نشت در گره i ، D_l مقدار مصرف محاسبه شده در زمان فرض نشت در گره i، NN تعداد گره‌های شبکه و l شمارندهٔ گره‌ها است. Tek تعداد تکرارها در حلقهٔ دوم برنامهٔ کلونی مورچه‌ها است و نشان می‌دهد در صورت عدم رسیدن برنامه به پاسخ با دقت مطلوب، تحلیل‌ها در چه تکراری متوقف خواهد شد. مقداری که باید کمینه شود، مجموع تعداد تکرارها در برنامهٔ کلونی مورچه‌ها و تفاضل قدر مطلق خطاها برای هر یک از Tek _ m جابه‌جایی فشارسنج است. در طی برنامه کلونی مورچه‌ها اگر طی تکرارها نتیجه به دقت مطلوب برسد طبق رابطه فوق به دلیل ناچیز شدن خطا، تعداد تکرارها (Tek) در انتخاب بهترین موقعیت فشارسنجی تعیین کننده می‌باشد و در صورت عدم رسیدن به جواب با دقت مورد نظر، تحلیل‌ها در تکرار ثابتی متوقف خواهد شد و عملاً مقدار خطای باقیمانده سرنوشت بهترین پاسخ را مشخص خواهد کرد. پس از مشخص شدن موقعیت بهترین نقاط برای فشارسنجی در LN بارگذاری مختلف، گره‌هایی که بیشترین تکرار را در بین گره‌های بهینهٔ فشارسنجی دارا باشند، به عنوان بهترین نقاط فشارسنجی در حالت کلی معرفی خواهند شد. رابطه (٤) محاسبه این پارامتر را نشان می‌دهد.

$$PLR_l = \sum^{LN} PL_{il} \qquad (٤)$$

که در آن PLR_l تعداد دفعاتی را که نقطه lام به عنوان بهترین موقعیت فشارسنجی انتخاب شده نشان می‌دهد و PL_{il} ماتریسی با LN سطر و NN ستون می‌باشد و در صورتی که گره lام در بارگذاری iام جزء گره‌های بهینه فشارسنجی باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود. برای بررسی دقت نشت‌یابی با یک تعداد فشارسنج ثابت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_k = \frac{NCR}{NA} \qquad (٥)$$

که در آن F_k دقت روش را نشان می‌دهد و بین صفر تا ۱ متغیر است، k تعداد فشارسنج انتخابی، NCR تعداد دفعاتی که موقعیت نشت صحیح شناسایی شده است و NA تعداد کل آنالیزهای انجام شده است که از روابط زیر محاسبه می‌شود:

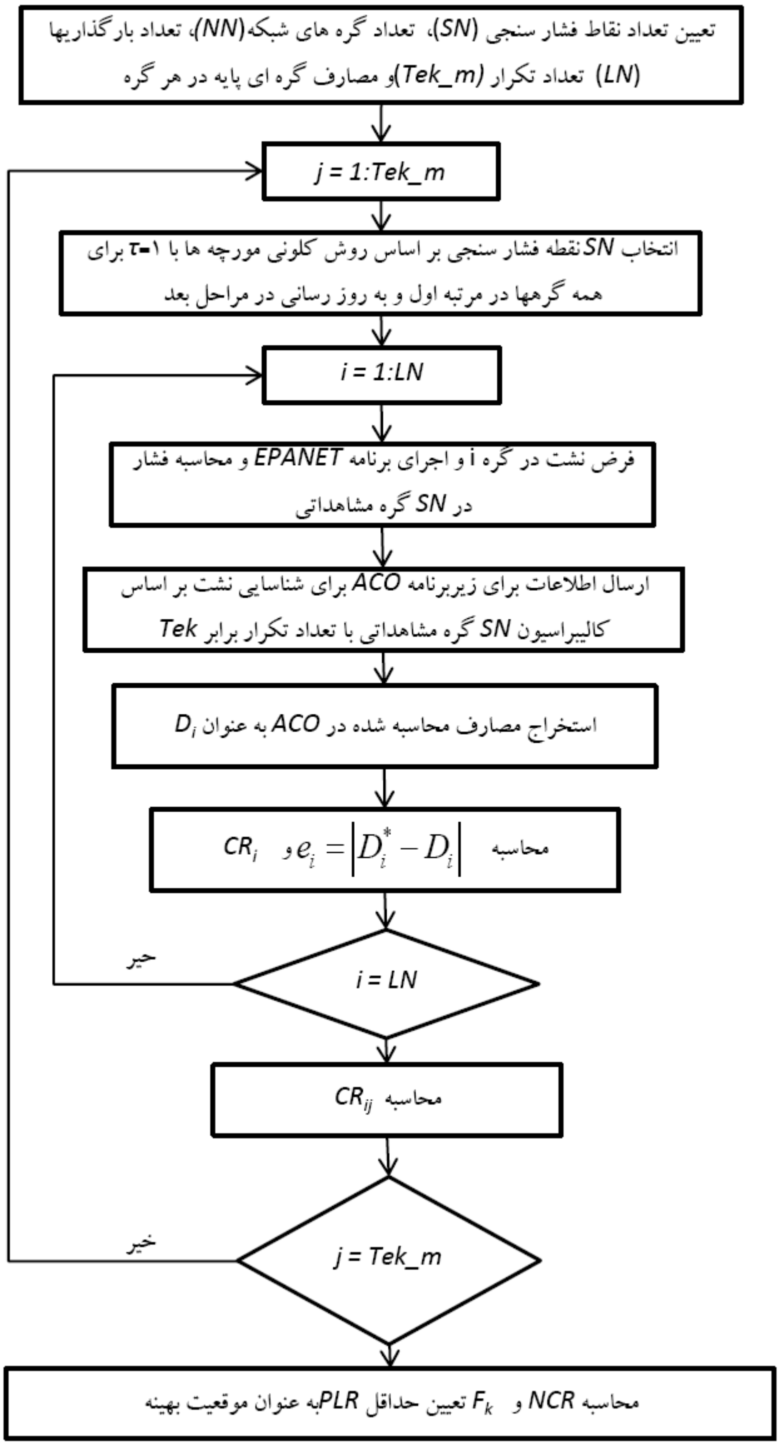
$$NCR = \sum_{i=1}^{LN}\sum_{j=1}^{Tek_m} CR_{ij} \qquad (٦)$$

$$CR_{ij} = \begin{cases} 1 & \sum_{l=1}^{NN}\left|D_l^* - D_l\right| < e_m \\ 0 & \text{else} \end{cases} \qquad (٧)$$

که در این روابط CR_{ij} در صورت شناسایی صحیح موقعیت نشت در بارگذاری iام و جابه‌جایی فشارسنج j ام ، ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود. Tek _ m تعداد حالت های تغییر موقعیت فشارسنج‌ها، LN تعداد دفعات جابجایی نشت (تعداد بارگذاری ها)، e_m مقدار خطای مجاز است که با توجه به دامنه های انتخابی مصارف برای هر شبکه توسط طراح تعیین می‌شود. به عنوان مثال اگر مقدار نشت ۲ لیتر بر ثانیه و بازه جستجو بین ۰ و ۵ با فواصل ۱ لیتر بر ثانیه باشد، در صورت انتخاب صحیح مقدار مصارف برای کلیه گره‌ها، پارامتر $\sum_{l=1}^{NN}\left|D_l^* - D_l\right|$ برابر صفر خواهد بود. با توجه به اینکه مقادیر نشت فرضی در شبکه‌های تحلیل شده در این مقاله همواره جزء دامنه جستجو می‌باشند، e_m برابر ۰/۰۰۰۱ فرض شده است. فلوچارت برنامه در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این فلوچارت ۲ حلقه وجود دارد. در حلقه بزرگتر به ازای تعداد تکرار از قبل مشخص شده ای موقعیت فشارسنج‌ها تغییر می‌کند. و حلقه داخلی در هر موقعیت نصب فشارسنج برای LN حالت بارگذاری

مختلف مقدار و موقعیت نشت را شناسایی کرده و سپس با استفاده از رابطه (۷) CR_{ij} را محاسبه می‌کند.

پس از اتمام تکرارهای پیش‌بینی شده، پارامترهای PLR_l، NCR و F_k نیز محاسبه خواهد شد.



شکل ۱ فلوچارت برنامه

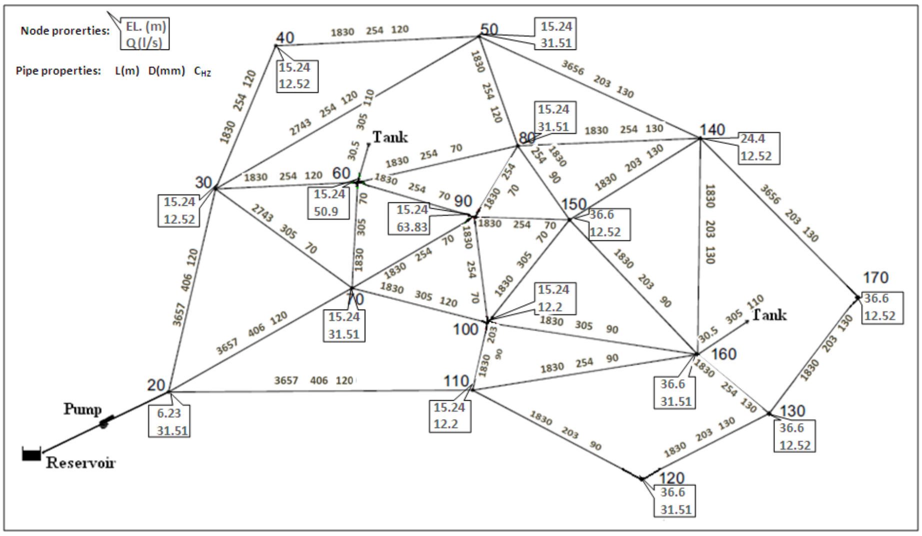
مطالعهٔ موردی

شبکهٔ انتخابی در مقالات با عنوان مدل انیتون شناخته می‌شود که توسط والسکی و همکاران در سال ۱۹۸۷ مورد استفاده قرار گرفت و تاکنون در حل مسائل مختلف در زمینهٔ مهندسی آب از آن استفاده شده است و بررسی‌های زیادی برای بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی بر روی آن انجام شده است [3,4,5]. شبکهٔ انیتون که در شکل (۲) نمایش داده شده است، دارای ۱٦ گره، ۳٤ لوله ، ۳ پمپ موازی، ۱ مخزن با ارتفاع ۳/۰٤ متر و ۲ تانک با ارتفاع ۷۱/٦ متر می‌باشد. مشخصات گره‌های شبکه و لوله‌ها در شکل (۲) و مشخصات پمپ‌ها در جدول (۱) درج شده است. برای استفاده از روش حاضر، ابتدا شبکهٔ مورد نظر با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) و شکل (۲) در نرم‌افزار اپیانت ۲. مدل و فایل خروجی آن با پسوند inp ذخیره می‌شود. سپس تعداد گره‌های شبکه، تعداد فشارسنج مورد نظر و میزان مصارف گرهی برای هر گره به برنامهٔ نوشته شده در متلب معرفی می‌شود و بابرقراری ارتباطی پویا بین دو نرم افزار اطلاعات تحلیل‌های هیدرولیکی به نرم افزار متلب ارسال می‌گردد.

نتایج بهینه‌یابی موقعیت فشارسنجی در این مدل با چهار فشارسنج در تحقیقات مختلف در جدول (۲) درج شده است[4,5,14]. هم‌چنین تعداد بهینهٔ فشارسنجی بر اساس آنالیز حساسیت و هزینه در تحقیقات کاپلان و همکاران ۷ مورد[14]، بهزادیان و همکاران [5]، ٦ مورد پیشنهاد شده است. در تحلیل این شبکه پارامتر حداکثر تعداد تکرار برای یافتن بهترین نقاط فشارسنجی (Tek_m) برابر با ۲٦، تعداد تکرار (Tek) در ACO برای کالیبراسیون ۵۰۰، پارامتر فرومون در ابتدای هر مرحله برای کلیه نقاط ۱ و راهنمای کاوشی برای گره‌های پیشنهادی روش والسکی، ۱۰ و برای سایر نقاط ۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۱ مشخصات پمپ‌ها

شماره پمپ	گره بالا دست	گره پایین دست	منحنی *QH*	
			H(m)	*Q(l/s)*
۱، ۲ و۳	۵۰۰	۲۰	۹۱/۴	۰
			۸۲/۳	۲۵۲/۵
			۵۵/۲	۵۰۴/۷



شکل ۲ شبکه مورد مطالعه انیتون [٤]

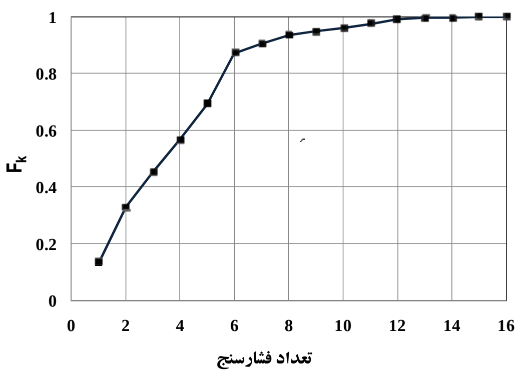
از آن‌جا که تعداد گره‌ها برابر با ۱٦ و نیز حداکثر تعداد تکرار برای یافتن بهترین نقاط فشارسنجی در هر نشت فرضی (Tek_m) برابر با ۲٦ در نظر گرفته شده است، در هر بار تحلیل تعداد کل حالت‌ها برابر با ٤۱٦ حالت می‌باشد. با توجه به شکل (۳)، اگر تنها از یک فشارسنج استفاده شود، از بین ۲٥٦ حالت امتحان شده (۱٦ بارگذاری و ۱٦ تغییر موقعیت فشارسنج) در ۳٤ مورد جواب صحیح حاصل می‌شود که براساس شکل (٤) میزان دقت نسبی ۰/۱۳ به‌دست می‌دهد و با به‌کار بردن تعداد ۲ فشارسنج، از بین ٤۱٦ حالت امتحان شده (۱٦ بارگذاری و ۲٦ تغییر موقعیت فشارسنج) ۱۳٦ بار جواب به‌دست می‌آید که دقت نسبی ۰/۳۳ می‌گردد. به همین ترتیب با افزایش تعداد نقاط فشارسنجی، تعداد دفعات رسیدن به جواب نیز افزایش پیدا می‌کند. با مقایسهٔ تعداد دفعات رسیدن به جواب و تعداد فشارسنج، این موضوع روشن می‌شود که بیشترین جهش در رسیدن به جواب بین ٥ و ٦ عدد فشارسنج می‌باشد، یعنی تعداد ٦ فشارسنج می‌تواند از نظر اقتصادی به صرفه باشد که نظر بهزادیان و همکاران [5] را مورد تأیید قرار می‌دهد. باید توجه نمود که تعداد فشارسنجی برای رسیدن به یک سطح اعتماد مشخص به پارامترهای متعددی بستگی دارد. در روش ژاکوبین، تعداد و واریانس خطای پارامترها تأثیر مستقیم بر روی این دقت دارد و در روش حاضر نیز تعداد و مقدار نشت، دامنهٔ تغییرات و فواصل گسسته‌سازی پارامترها تعیین‌کننده است لذا نمی‌توان تعداد فشارسنجی ثابتی را به‌عنوان حالت بهینه برای کلیه موارد ذکر نمود و باید متناسب با هدف و روش بهینه‌یابی و دقت مورد انتظار این تعداد تعیین شود.

جدول ۲ موقعیت‌های فشارسنجی بهینه برای ٤ فشارسنج در تحقیقات مختلف و کار حاضر

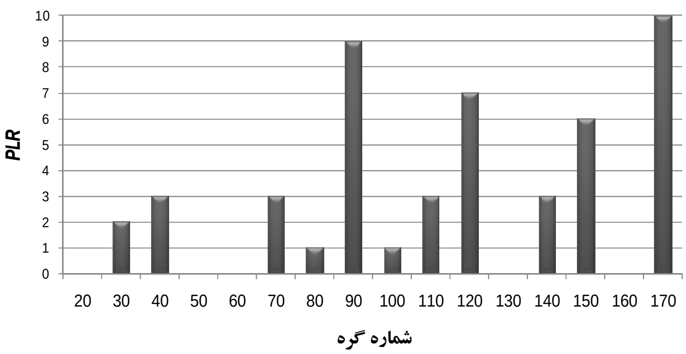
ردیف	روش	مرجع	ن۲	ن۳	ن۴	ن۵	ن۶	ن۷	ن۸	ن۹	ن۱۰	ن۱۱	ن۱۲	ن۱۳	ن۱۴	ن۱۵	ن۱۶	ن۱۷
۱	MOGA-ANN model	[5]								۱	۱		۱					۱
۲	MCS-based model	[5]					۱			۱			۱					۱
۳	MOGA-Poreto optimal front CAO1	[14]			۱					۱		۱	۱					
٤	MOGA-Poreto optimal front CAO2	[14]									۱		۱		۱		۱	
٥	MOGA-Poreto optimal front CAO3	[14]			۱					۱		۱	۱					
٦	GA	[4]			۱					۱		۱	۱					
۷	MOGA-Poreto optimal front	[4]			۱					۱		۱	۱					
۸	ACO	کارحاضر								۱			۱			۱		۱



شکل ۳ تعداد موقعیتهای صحیح شناسائی نشت (NCR) به صورت تابعی از تعداد فشارسنج



شکل ٤ بررسی دقت روش به ازای تعداد فشارسنج‌های مختلف (F_k)



شکل ۵ موقعیت بهترین مکان فشارسنجی، *PLR*

بهترین موقعیت فشارسنج‌ها برای تعداد ٤ نقطهٔ فشارسنجی با این روش و استفاده از رابطهٔ (٤)، براساس جدول (۲) با نتایج سایر تحقیقات انطباق نسبتاً خوبی دارد. هم‌چنین تعداد تکرار انتخاب گره‌های مختلف برای انتخاب ٤ گره به‌عنوان بهترین نقاط فشارسنجی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بهترین نقاط فشارسنجی، گره‌های ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ می‌باشند. هم‌چنین با توجه به این نمودار، گره‌های ۲۰، ۵۰، ٦۰ ، ۱۳۰ و ١٦۰ هیچ‌گاه در بین ٤ فشارسنج بهینه نبوده‌اند و با مراجعه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با نتایج سایر تحقیقات انطباق خوبی دارد. هم‌چنین گره ۱۷۰ ده بار، گره ۹۰ نه بار، گره ۱۲۰ هفت بار و گره ۱۵۰ شش بار به عنوان بهترین موقعیت فشارسنجی انتخاب شده اند. گره‌های ٤۰، ۷۰، ۱۱۰ و ١٤۰ نیز هر کدام ۳ مرتبه جزء گره‌های بهینه برای نشت‌یابی قرار گرفته‌اند.

در مقایسهٔ روش حاضر با روش استفاده از ماتریس ژاکوبین این نکته نیز باید مد نظر قرار گیرد که این روش پایهٔ احتمالاتی و آماری دارد و تحلیل شبکه برای یافتن نقاط بهینه در این روش نسبت به‌روش‌های قبلی زمانبرتر می‌باشد ولی با توجه به توسعه کامپیوترها و این‌که این تحلیل برای هر شبکه فقط یک بار انجام می‌شود این مسأله مشکل چندانی در استفاده از این روش در شبکه‌های بزرگ ایجاد نمی‌کند ضمن اینکه تهیهٔ ماتریس ژاکوبین که در روشهای پیشین مورد نیاز است خود عملیاتی زمانبر می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله مسأله طرح نمونه‌گیری با هدف شناسایی بهترین موقعیت برای نصب فشارسنج و تعداد آن‌ها در شبکهٔ توزیع آب به منظور نشت‌یابی مورد بررسی قرار گرفت. روش ارائهٔ شده در این مقاله، روشی کاربردی

با دقت مناسب است که برخلاف روش‌های قبلی نیاز به تشکیل دستگاه معادلات معین ندارد و به لحاظ کاربردی، محدودیت های کمتری دارد. این روش در شبکه‌ای که در مقالات متعدد به منظور انجام کالیبراسیون و طرح نمونه‌گیری مورد استفاده قرار گرفته، مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحلیل این شبکه، پارامترهای مجهول مصارف گره ای بدون انجام گروه بندی لحاظ گردید که از نظر نوع و تعداد پارامترهای مجهول، مسأله بهینه‌یابی را نسبت به دیگر تحقیقات دشوارتر نموده بود. بررسی مصرف به عنوان پارامتر متغیر نسبت به زبری پیچیده‌تر می‌باشد. هم‌چنین در این مقاله ۱۶ پارامتر مجهول وجود دارد. استفاده از این روش در این شبکه و مقایسه با نتایج ارائهٔ شده در دیگر مقالات انطباق خوبی از نظر تعداد فشارسنج بهینه و هم‌چنین موقعیت بهینهٔ فشارسنج‌ها نشان داد. بر این اساس روش ارائهٔ شده در این مقاله ضمن ارائهٔ روشی نوین که برای بهینه‌یابی موقعیت های فشارسنجی همراه بوده و دقت مناسب در مقایسه با روش‌های پیشین کاملاً منحصر بفرد است، پیشین نتایج خوبی را در شرایط واقعی از خود نشان می‌دهد.

مراجع

1. Shamir, U., and Howard, C. D. D. “Water Distribution Systems Analysis.” *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 94(1), 219–234, (1968).
2. Walski, T. M., “Technique for Calibrating Network Models.” *Journal of Water Resources Planning and Management*., 109(4), pp. 360–372, (1983).
3. Kapelan, Z. S., Savic, D. A. and Walters, G. A. “Multiobjective Sampling Design for Water Distribution Model Calibration.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(6), pp. 466-479, (2003).
4. Kapelan, Z. S. and Savic, D. A.“Optimal Sampling Design Methodologies for Water Distribution Model Calibration.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131(3), pp. 190-200, (2005).
5. Behzadian, K., Kapelan, Z., Savic, D. and Ardeshir, A. “Stochastic Sampling Design Using a Multi-objective Genetic Algorithm and Adaptive Neural Networks.” *Environmental Modeling & Software*, Vol. 24, pp. 530–541, (2009).
6. Isovitsch, S. L. and VanBriesen, J. M., “Sensor Placement and Optimization Criteria Dependencies in a Water Distribution System.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 134:(2), pp. 186-196, (2008).
7. Wu, Z. Y. and Sage, P., “Water Loss Detection Via Genetic Algorithm Optimization–Based Model Calibration.” ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio, (2006).
8. Karris, S. T., “ Numerical Analysis Using MATLAB and Excel.” Third Edition, Orchard Publications, (2007).
9. Rossman L. A., “EPANET.2 Users Manual.” Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, OH 45268, (2000).
10. Ostfeld. A., and Tubaltzev, A., “Ant Colony Optimization for Least-Cost Design and Operation of Pumping

Water Distribution Systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 2, pp. 107-118, (2008).

11. Maier, H. R., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y. and Tan, C. L., "Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 3, pp.200-209, (2003).
12. Cheung, P. B., Abe, N. and Propato, M., "Night Flow Analysis and Modeling for Leakage Estimation in a Water Distribution System." *Integrating Water Systems –Maksimovi´c*, Taylor & Francis Group, pp. 509-513, (2010).
13. Kang, D. S., and Lansey, K. "Real-time State Estimation and Confidence Limit Analysis for Water Distribution Systems." *J. Hydraul. Eng*., 135(10), 825–837, (2009).
14. Kapelan, Z., Savic, D.A., Walters and G.A., "Multiobjective Design of Water Distribution Systems under Uncertainty", *Water Resources Research* 41 (11), W11407, doi:10.1029/2004WR003787, (2005).